

VŠB-Technická univerzita

Ostrava Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

**Využití tryskové injektáže v podzemním
stavitelství**

Use of Jet Grouting in Underground Engineering

Student:

Jaroslav Třečák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Třečák**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Využití tryskové injektáže v podzemním stavitelství**
Use of Jet Grouting in Underground Engineering

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Představení technologie tryskové injektáže
3. Praktické využití technologie při výstavbě podzemních staveb
4. Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Jaga Bratislava 2003
Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*. Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.
Wood, M., Marshall, A. *Tunneling: management by design*. London: E & FN Spon, 2000. ISBN 0-419-23200-1.
Bonapace, P. a kol. *NATM - The Austrian Practice of the Conventional Tunnelling*. Graz 2010. ASG Salzburg. ISBN: 978-3-200-01989-8.
Odborné časopisy - Tunel, firemní zpravodaje (Metrostav, Subterra)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 30.10.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. –autorský zákon, zejména § 35 –užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 –školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská –Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Lukášovi Ďurišovi, Ph.D., za připomínky a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

Současně děkuji firmě Zakládání staveb a.s. za poskytnuté podklady. Neméně byla důležitá podpora mé rodiny po celou dobu studia, které touto cestou také děkuji.

ANOTACE:

Bakalářská práce se zabývá metodou zvanou trysková injektáž konkrétně zaměřenou na podzemní díla.

Jedná se především o jednu z nejmodernějších, a hlavně nejúčinnějších metod hlubinného zakládání. Metoda je rychlá, prostorově nenáročná, ovšem finančně nákladná.

V bakalářské práci je obsaženo samotné vysvětlení a princip využití tryskové injektáže, dále pak její metody, technologický postup, provádění tryskové injektáže v podzemí a nakonec příklady z praxe. V jednotlivých příkladech je uvedena daná problematika geologických podmínek a postup jejího řešení.

Klíčová slova: trysková injektáž, zakládání staveb, hlubinné zakládání, podzemí

ANNOTATION:

Bachelor work deals with a method called jet grouting specifically focused on underground works.

It is primarily one of the most modern and most effective methods of deep foundation. The method is fast, space-saving, but expensive.

Within the bachelor work, it is possible to follow the explanation and the main use of jet grouting, then its methods, technological procedures, application jet grouting in underground and other possibilities from practice. The individual examples present the issue of geological conditions and the procedure of the determined solutions.

Keywords: jet grouting, foundation engineering, deep foundation, underground

Obsah

1. ÚVOD	1
2. METODY INJEKTÁŽE V PODZEMÍ	2
2.1. INJEKTÁŽNÍ MÉDIA	2
2.1.1. CHEMICKÁ INJEKTÁŽ.....	2
2.1.2. CEMENTOVÁ INJEKTÁŽ.....	3
2.1.3. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ.....	3
2.2. INJEKTÁŽ HORNIN PODZEMNÍCH DĚL	4
3. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ.....	6
3.1. VYUŽITÍ TRYSKOVÉ INJEKTÁŽE	7
3.2. METODY POUŽITÍ TI.....	8
3.3. OBECNÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP VYUŽITÍ TI.....	9
4. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ PRO PODZEMNÍ DÍLA	12
4.1. PŘEHLED PRINCIPŮ VYUŽITÍ DEŠTNÍKŮ	13
4.2. KLASIFIKACE DEŠTNÍKOVÉ METODY	15
4.2.1. NÁVRH VYZTUŽENÉHO DEŠTNÍKU	19
4.2.2. METODY VRTÁNÍ	20
4.3. METODA MIKROTUNELOVÁNÍ.....	20
5. PŘÍKLADY Z PRAXE	22
5.1. TUNEL ŽILINA.....	22
5.1.1. SKUTEČNÉ ZASTIŽENÉ POMĚRY	23
5.1.2. ZADÁNÍ STAVBY	23
5.1.3. PRACOVNÍ PLOCHA.....	24
5.1.4. POUŽITÉ MECHANISMY	24
5.1.5. PROVEDENÍ VRTŮ PRO TI	25
5.1.6. INJEKČNÍ SMĚS	26
5.1.7. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ.....	26
5.1.8. ZÁVĚR PROVEDENÍ	26
5.2. TUNELOVÝ KOMPLEX BLANKA.....	27
5.2.1. GEOLOGICKÉ POMĚRY	28
5.2.2. ZADÁNÍ STAVBY	29
5.2.3. PRACOVNÍ PLOCHY A VYTÝČENÍ	29
5.2.4. POUŽITÁ MECHANIZACE.....	30
5.2.5. MECHANIZACE PRO VÝROBU A UCHOVÁNÍ INJEKČNÍ SMĚSI, DÁVKOVACÍ A SKLADOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	30
5.2.6. HLOUBENÍ VRTŮ PRO TI	30

5.2.7.	SLOŽENÍ INJEKČNÍ SMĚSI	31
5.2.8.	TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ	31
5.2.9.	ZKOUŠKY PŘI REALIZACI TI + MARSHOVA METODA	32
5.2.10.	ZÁVĚR PROVEDENÍ	32
5.3.	RAŽBA KOLEKTORU VODIČKOVA V PRAZE 1.....	33
5.3.1.	GEOLOGICKÉ POMĚRY	34
5.3.2.	PRACOVNÍ PLOCHY A VYTÝČENÍ	34
5.3.3.	POUŽITÁ MECHANIZACE.....	35
5.3.4.	TECHNOLOGIE RAŽENÍ A VYZTUŽENÍ.....	35
5.3.5.	TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ	36
5.3.6.	ZÁVĚR PROVEDENÍ	37
6.	ZÁVĚR	38
7.	ZDROJE.....	40
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ	42

1. ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na úpravu vlastností hornin a zemin, a to konkrétní metodou, zvanou trysková injektáž. Jedná se o speciální geotechnickou práci, která se používá za účelem zlepšení vlastností zemin pro jejich zpevnění a vytvoření nosného prvku za účelem přenášet zatížení. Dále tato metoda nabízí uplatnění jako základový prvek. Vzhledem k malé náročnosti na prostor, lze TI použít v mnoha situacích, např. stabilizace půdy při hloubkovém výkopu, vodotěsná zeď v násypech nebo přehradě, utěsnění prosakování podzemních staveb, prevence při poklesech způsobené čerpáním podzemní vody a zlepšení dlouhodobého deformačního chování zemin.

Co se týče výhod v této oblasti základových prvků je, že dochází k promísení zeminy se směsí přímo ve vrtu. Důsledek toho vede k další výhodě, a to především rychlosti technologického postupu. Metoda tryskové injektáže má široké zastoupení využití v horninovém prostředí, zejména v nesoudržných zeminách od měkkých kašovitých zemin až po šterky.

Nevýhodou tryskové injektáže je především vysoká cena provedení a poměrně nízká únosnost v ohybu. Nicméně únosnost v ohybu jsme schopni částečně zabránit, vložením výztuže do pilíře.

U podzemních staveb konkrétně při výstavbě tunelu, kde ražba probíhá ve špatných geologických podmínkách a horní část výrubu se jeví jako nestabilní, je nutné před začátkem ražby zpevnit horninu. Jako vhodný prvek výztuže v tunelování je metoda obálky. Cílem obálek je vytvořit obloukovitou skořepinu kolem výrubu tunelu.

Pokud se stavební dílo nachází v malé hloubce, trysková injektáž umožňuje vyztužení nadloží tunelu pomocí vějíře z povrchu území.

V případě nesoudržných zemin, kde je zapotřebí podepřít klenbu primárního ostění tunelu se nabízí metoda tryskové injektáže pod patou klenby.

Trysková injektáž je jedna z metod, která nabízí nejen široké spektrum využití v oblasti zakládání staveb, ale také při výstavbě raženého tunelu. V této práci bych rád objasnil, jak je tato technologie používána v podzemí.

2. METODY INJEKTÁŽE V PODZEMÍ

K injektáži dochází, když injektážní malta vyplňuje póry půdy nebo trhliny hornin, aniž by docházelo k významnému pohybu půdy nebo skalního útvaru. V podstatě se jedná o nahrazení vody či vyplnění vzduchových pórů v dutinách mezi půdními částicemi nebo hornin injektážní hmotou. Injektážní tlak je předem zvolený tak, aby nedošlo k narušení injektovaného prostředí. Používá se jako prostředek pro stabilizaci půdy v mnoha inženýrských projektech, kde soudržné a stabilní půdy či horniny vyžadují účelově zvýšit pevnost nebo snížit propustnost.

V rámci injektáže máme hned několik typů, které se využívají za účelem úpravy či stabilizace půd při realizaci výstavby tunelu. Určitá vylepšení zvýšila její užitečnost, jak při kontrole podzemních vod, tak při stabilizaci půdy pro projekty tunelování. Při tunelování jde o tyto konkrétní situace: [10]

- vyztužit jakkoliv uvolněnou či nestabilní půdu nebo horninu a zabránit tak poklesům
- snížit propustnost a zároveň i průtok podzemních vod
- stabilizace písčité půdy

Konstrukce deštníkové metody se používá za účelem stabilizace půdy po obvodu budoucího tunelu. Co se týče této metody, jsou použity injektáže (chemické nebo cementové) a tryskové injektáže.

Veškerý popis o každé injektážní metodě vychází z „Verifikace geotechnické injektáže“ publikované ASCE (1995). [11]

2.1. INJEKTÁŽNÍ MÉDIA

V podzemí se používají média injektáží na bázi cementu nebo chemické směsi.

2.1.1. CHEMICKÁ INJEKTÁŽ

Primárně se používala ke stabilizaci zrnitých materiálů a k úpravě jemně rozpukaných hornin. Cílem je zvýšení pevnosti nebo zpomalení průsaku vody. Injektáž chemickými látkami vyplňuje dutiny v půdě nebo horninách chemikálií, která vytvrdne a následně změní vlastnosti

geologického prostředí. Výběr konkrétní chemické injektáže má zásadní význam a nutno brát v úvahu, tyto aspekty:

- velikost dutin a typ prostředí
- problémy s manipulací včetně hořlavosti a chemická odolnost
- stálost injektážní hmoty v důsledku toxicity prostředí a jiné enviromentální problémy
- viskozita
- cena

2.1.2. CEMENTOVÁ INJEKTÁŽ

Směs se skládá z cementu, vody a často obsahuje přísady, jako je jí, bentonit, křemičitan sodný, zpomalovače a urychlovače. V naprosté většině se na cementové injektáže používá portlandský cement. Účinnost závisí na těchto faktorech:

- velikost částic směsi vzhledem k průměru pórů v prostředí nebo šířce puklin
- stabilizace injektážního tlaku
- rychlost čerpání

Příklad složení:

Nejčastějším složením cementové injektážní směsi je směs o poměru C:V = 2,25:1. Každá taková směs je specifikována svými vlastnostmi: [3]

Objemová hmotnost	1880 kg/m ³
Vodní součinitel	0,4 - 0,5
Viskozita podle Marshe	40-45 s
Dekantace	1 %/1 hod, resp. do 3 %/2 hod
Pevnost v prostém tlaku	20 MPa/7 dní, 27 MPa/28 dní

2.1.3. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

Pevnost směsi tryskové injektáže je zásadní aspekt pro aplikaci metody v tunelu. Stanovená pevnost v tlaku by měla být založena na analýze, protože použití zbytečně vysokého tlaku značně zvyšuje náklady. Vlastnosti prvku vytvořeného metodu TI závisí na: použitém systému, parametrech TI, umístění HPV, době tvrdnutí směsi a vlastnostech půdy. V závislosti na aplikaci TI záleží na: rozměrech, umístění, pevnosti a propustnosti.

Příklad složení:

Pro výrobu cementové směsi se používá portlandský cement CEM II 32,5 případně CEM II 42,5. Nejčastějším složením směsi pro tryskovou injektáž je směs o poměru $c/v = 0,8$. Každá taková směs je specifikována svými vlastnostmi:

Objemová hmotnost	1430 kg/m ³
Viskozita	27,4 s
Dekantace	16 %/1 hod, resp. do 40 %/2 hod
Pevnost v prostém tlaku	6 MPa/7 dní, 11 MPa/28 dní

2.2. INJEKTÁŽ HORNIN PODZEMNÍCH DĚL

Při injektáži hornin podzemních děl máme tři metody postupů:

Zlepšení geotechnických vlastností z povrchu území

Při této metodě je důležité, aby se podzemní dílo vyskytovalo v malé hloubce. Z povrchu území lze vyztužit vrt pomocí ocelové trubky. Po vyhloubení vrtu do stanovené hloubky dle dokumentace je vrt zaplněn zálivkou, do které se vloží obyčejné ocelové manžetové trubky. Délka a vzdálenost manžetové části trubky je opět stanovena dokumentací nebo technologickým předpisem. Složení a parametry injektážní směsi jednotlivých fází injektáže jsou dány dokumentací v závislosti na geotechnické průzkumu daného místa injektážního prostředí

Zlepšení geotechnických vlastností hornin ze směrové štoly

Při velkém rozsahu prací se injektáž provádí pomocí vrtů hloubených ze směrové štoly ražené v ose tunelu. Následně se pak hornina v nadloží vyztužuje pomocí injektážní směsi z vrtů tvořící vějíř. Vzdálenost vějířů a jednotlivých vrtů, jejich délky a prostorové umístění, složení injektážní směsi a postup práce určuje dokumentace.

Zlepšení vlastností horniny čelby (pomocí deštníků)

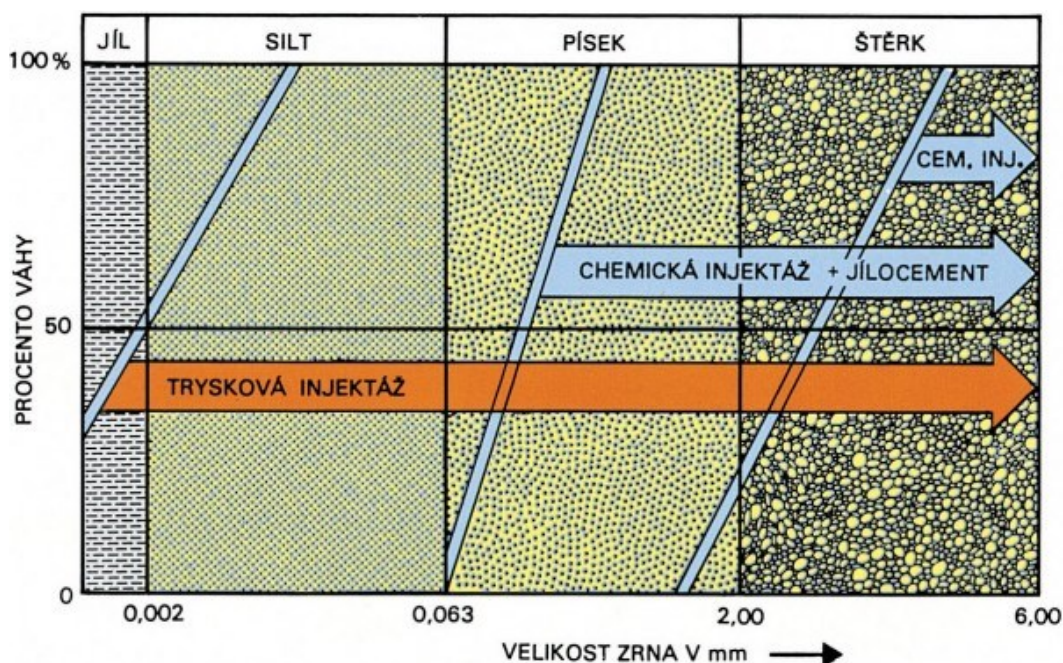
Vyztužení horniny v klenbě tunelu nebo i jiného podzemního díla, vyskytující se v místě oslabených hornin, lze provést ocelové trubky vložené do zálivky do vrtů v tunelu nad budoucím výrubem. Jako injektážní směs je použita cementová suspenze a do vrtů se čerpá přes ústí. Opět všechny náležitosti jako složení injektážní směsi, rozměry trubek a parametry jsou dány dokumentací v závislosti na prostředí. [3]

3. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

Trysková injektáž je moderní metoda zlepšování základových půd. Principem je využití dynamické energie paprsku většinou cementové injekční směsi tryskané pod vysokým tlakem. Tím je zemina rozrušena a současně promíšena se směsí, takže na místě vzniká kompozitní materiál z částic zeminy a cementu. Takto mohou být upravovány různé zeminy, od jílu až po balvanité štěrky, s odpovídajícími výsledky v rozsahu pevností 1 až 20 MPa. [1]

Trysková injektáž je náročná technologie, která vyžaduje speciální, kvalitní a mimořádně nákladné zařízení. Dále požaduje proškolené a zodpovědné pracovníky, obzvláště dostatek zkušeností, které lze získat pouze dlouhodobou praxí.

Na níže uvedeném obrázku je patrná široká oblast geologických podmínek pro aplikaci této metody (viz.obr.č.1). Vzhledem k používání maloprofilového vrtání je často vítaná na staveništích se stísněnými podmínkami, kde není možno použít mechanismy jiných metod, například ve sklepení budov. Velmi vhodná je pro podchycování a rekonstrukce základů stávajících objektů, neboť lze dosáhnout vynikajícího přenosu zatížení z konstrukce na nově vybudovaný základový prvek.

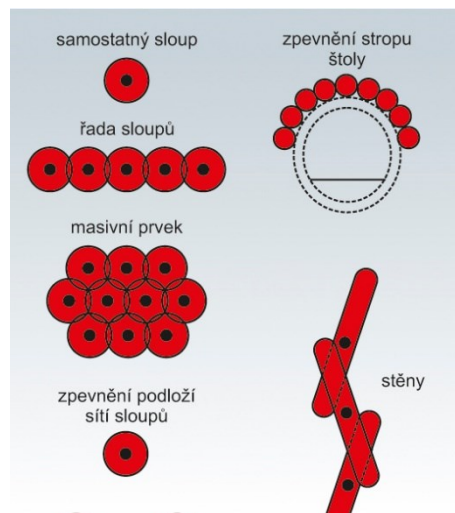


Obrázek 1 - Dosah využití TI [1]

3.1. VYUŽITÍ TRYSKOVÉ INJEKTÁŽE

Ve stavebnictví má trysková injektáž široké spektrum využití (viz.obr.č.2). Dokáže totiž řešit poměrně závažné problémy týkající se úpravy hornin a zemin. Možnosti využití: [2]

- Pro podchycování základů staveb (viz. obr.č.4)
- Pro budování nepropustných stěn zabraňujících šíření znečištění
- Vytváření obálek ražených podzemních objektů (viz. obr.č.3)
- Pažení stěn stavebních jam ve stísněných prostorech (viz. obr.č.5)
- Pažení šachet
- Přerušení smykových ploch sesuvů
- Konsolidaci stlačitelných zemin
- Zhotovení kořenů kotev ve složitých geologických poměrech
- Dotěsnění pažících konstrukcí jiných systémů



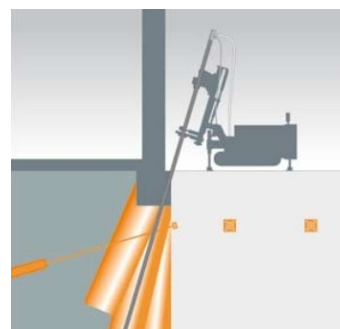
Obrázek 2 - Možnosti využití TI [2]



Obrázek 3-Obálka pro výrub štoly tunelu [21]



Obrázek 5- Podchycení stávajícího základu objektu [21]



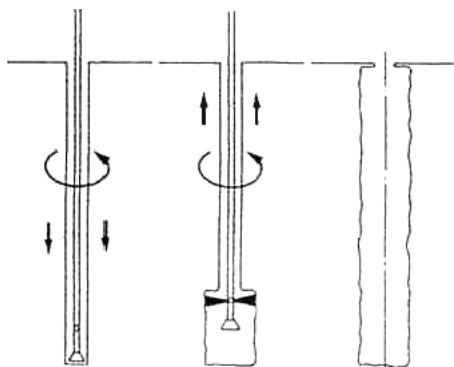
Obrázek 4-Zapažení výkopu stavební jámy kotvenou stěnou [21]

3.2. METODY POUŽITÍ TI

Požadovanou metodu a parametry TI stanoví dokumentace na základě geotechnických poměrů zkoumaného prostředí a požadavků na výsledek TI. V ojedinělých případech, kdy dokumentace stanoví pouze požadované výsledné parametry (hloubku, průměr tryskaného prvku a pevnost resp. propustnost injektovaného materiálu), stanoví druh a parametry tryskové injektáže technologický přepis.

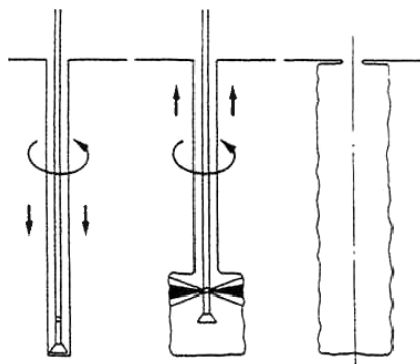
Jednotlivé označení technologie provedení dané injektáže mohou být odlišná. Jednotlivé firmy technologii TI mohou označit jinak. Příkladem jednofázového systému TI (možnost M1 ale také R1)

- Jednofázový systém TI (někdy označováno jako M1, R1) – Jedná se o technologii, při které se rozrušování zeminy a její následné zpevnění dosahuje jedním médiem o vysoké mechanické energii, obvykle paprskem cementové suspenze (viz.obr.č.6).



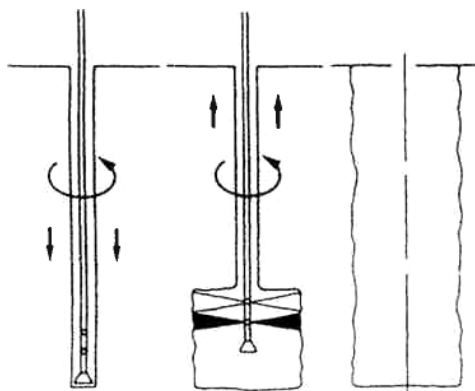
Obrázek 6- Technologie provedení jednofázové TI [5]

- Dvojfázový (vzduchový) systém (označováno jako M2, R2): technologie při níž se rozrušování zeminy a její následné zpevnění dosahuje vysokou mechanickou energií tryskaného paprsku, nejčastěji cementovou směsí spolu se stlačeným vzduchem (viz.obr.č.7).



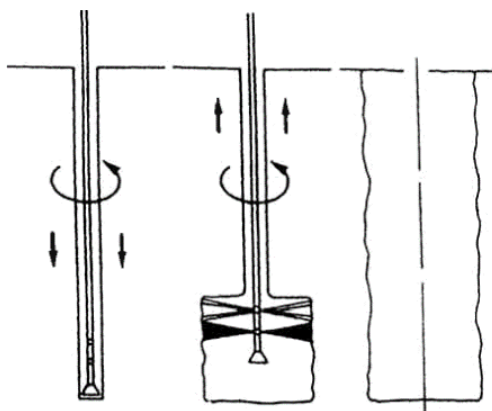
Obrázek 7- Technologie provedení dvojfázové vzduchové TI [5]

- Dvojfázový (vodní) systém (označováno jako M2, R2 s vodním předřezem): rozrušování zeminy dosahuje vysokou mechanickou energií vodního paprsku a zpevnění nastává odděleným paprskem injektážní směsi (viz.obr.č.8).



Obrázek 8- Technologie provedení dvojfázový (vodní) systém [5]

- Trojfázový systém (označováno jako M3, R3): technologie, při niž se rozrušování zeminy dosahuje vysokou mechanickou energií vodního paprsku za podpory stlačeného vzduchu a následné zpevnění nastává odděleným paprskem injektážní směsi (viz. obr.č.9). [3]



Obrázek 9- Technologie provedení trojfázový systém [5]

3.3. OBECNÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP VYUŽITÍ TI

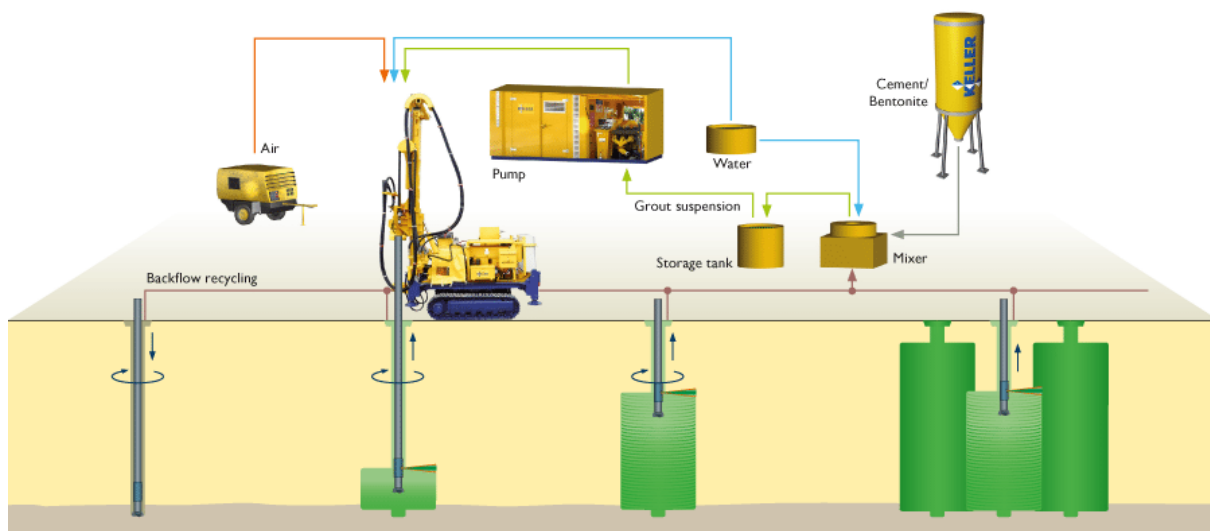
Před samotným zahájením prací, zhotovitel předloží objednavateli technologický předpis pro injektáž k souhlasu, případně i další technické a kvalitativní parametry, podmínky pro přesnost jejího provádění, dodací podmínky, podmínky pro kontrolu jakosti a dodací podmínky. Aby tento technologický předpis byl v souladu s dokumentací stavby, která obsahuje požadavky jako jsou: délka, průměr a sklon injektážních prvků.

V technologickém předpisu zhotovitel doloží tyto údaje:

- Metoda injektáže
- Postup injektáže z hlediska pořadí
- Výsledný tvar injektážního prvku
- Popis půdy
- Metodu a geometrii vrtání
- Údaje o materiálech + protokoly o testech zkouškách materiálu a vyhodnocení
- Parametry (rychlost a množství injektážní směsi, injektážní tlak)
- Druh a složení směsi
- Způsob kontroly
- Případné opatření vůči deformacím
- Stroje a zařízení
- Požadavky na zařízení pracoviště [3]

Trysková injektáž patří mezi poměrně náročnou technologii prací, kterou provádí pouze zodpovědná osoba s příslušným platným oprávněním. Dále pak pracovníci musí být řádně proškoleni a získat tak vhodnou kvalifikaci pro manipulaci s přístroji. Na celou tuhle činnost pracovníku pak dohlíží odborný pracovník.

Samotné staveniště pro práce s tryskovou injektáží se skládá z čerpací a mísící stanice, zásobníku vody a zásobník se stlačeným vzduchem (viz. obr.č.10). Před začátkem prací je potřeba provést opatření jako je třeba pažení a zpevňování, aby nedošlo na místě práce k újmě na zdraví pracovníků. [4]



Obrázek 10- Čerpací a mísící stanice značky KELLER [4]

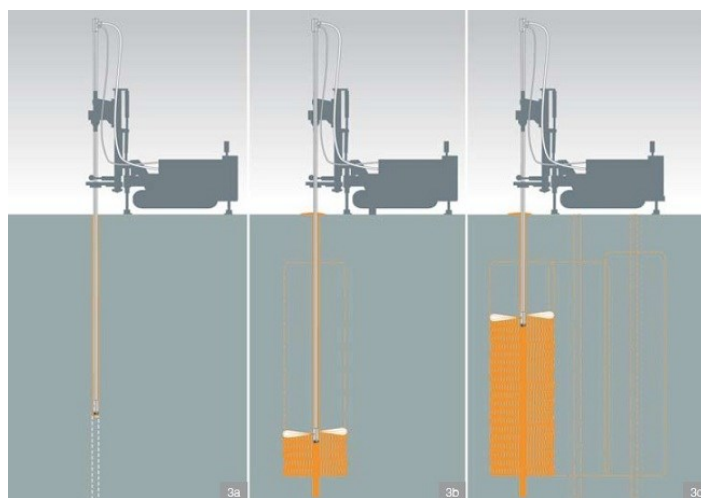
Zařízení staveniště pro tryskovou injektáž se skládá z kompaktní mísicí a čerpací stanice, zásobníků a sil. Odtud vede svazek hadic a kabelů k místu provádění tryskové injektáže. Zde pracuje vrtná souprava tryskové injektáže. Věž soupravy tryskové injektáže může být vysoká 2 m pro práci v suterénních prostorách a může dosahovat až 35 m, jestliže se jedná o práci prostorově neomezenou.

Postup v čerpací a mísicí stanici:

- Směs v míchačce
- Přesun do skladovacího kontejneru (dochází k domíchání směsi)
- Přejechod směsi do čerpadla (tlak čerpadla 50 MPa)
- Následná aplikace směsi dle požadované metody – u použití trojfázové a dvojfázové metody nutno použít kompresor dosahujících hodnot tlaku 2,5 MPa

Přípravné práce pro tryskovou injektáž začíná v moment vyhloubení vrtu pomocí vrtné soupravy (viz. obr.č.11) do požadované úrovně paty pomocí vrtné korunky s tryskami. Až se vrt dostane do určité hloubky, dochází z fáze vrtání na fázi tryskání vlivem ucpání vrtné kolony ocelovou kuličkou. Další krokem je rozrušování zeminy vlivem trysky a současně dojde i k zpevnění zeminy pojivem. Při této činnosti se začíná vytahovat a otáčet soutyčí s předem určenou rychlostí otáček i vytahování a nastaveným tlakem a průtokem média. Celý proces injektování jednoho vrtu končí při dosažení horní úrovně z injektovaného vrtu. Následně se celá vrtací souprava přesune nad budoucí vrt a celý tento technologický proces se opakuje.

Za účelem zlepšení v únosnosti v tahu i tlaku se po vyhotovení injektovaného vrtu vkládá válcovaný profil.



Obrázek 11- Vrtací souprava [21]

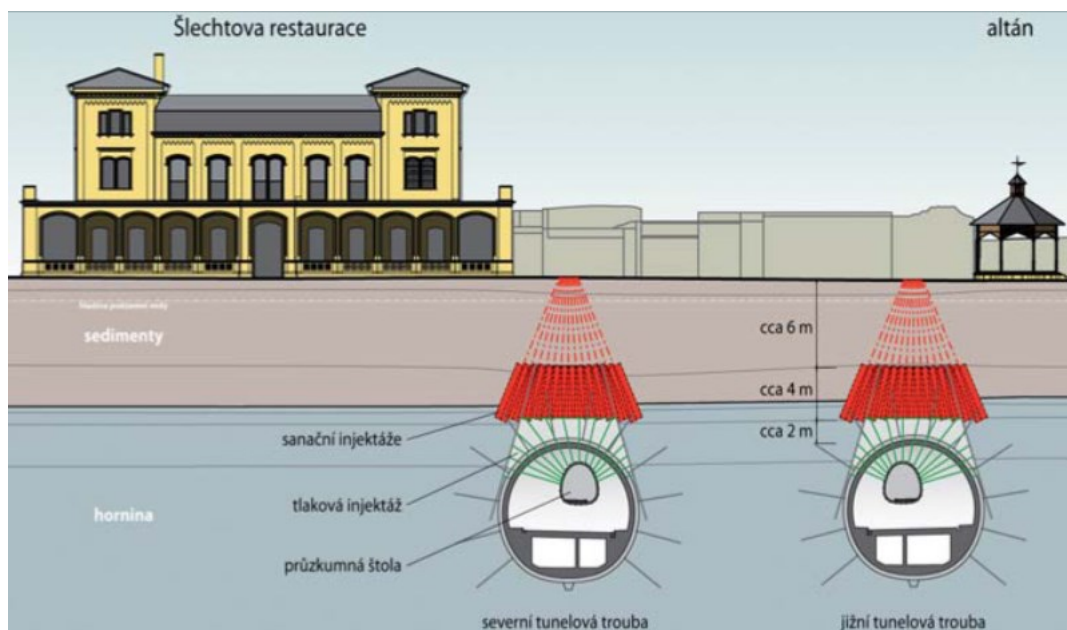
4. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ PRO PODZEMNÍ DÍLA

Stavba tunelů v nesoudržných a kašovitých zeminách je stále jeden z nejvíce náročných problémů ve stavebnictví vůbec. Z tohoto důvodu byly navrženy techniky, přičemž každá má své vlastní výhody a stejně tak i nedostatky.[6]. Příkladem může být Itálie. Z hlediska morfologie a geologických poměrů země jsou extrémně variabilní, a proto flexibilní konstrukční metody jsou velmi výhodné [7]. Ve skutečnosti se konstrukce tunelu, který se razí ve špatných půdních podmínkách obvykle dosahuje kombinací různých technik na zlepšování a stabilizaci půdy: klasická injektáž, trysková injektáž, mikropiloty, atd. V zásadě tak platí, že každá technika je nejvhodnější pro daný typ půdy i z hlediska podmínky průsaku.

Postup využití TI v podzemí lze přizpůsobit každému případu:

- **Ochranná obálka z TI** spolu s horninovou klenbou omezuje svírání podzemního díla a zamezuje i k nežádoucím vlivům na povrchu území
- **TI pod patou klenby** sloupky stříkaného betonu slouží jako podepření zhotovené klenby primárního ostění tunelu
- **Provádění TI z povrchu území**

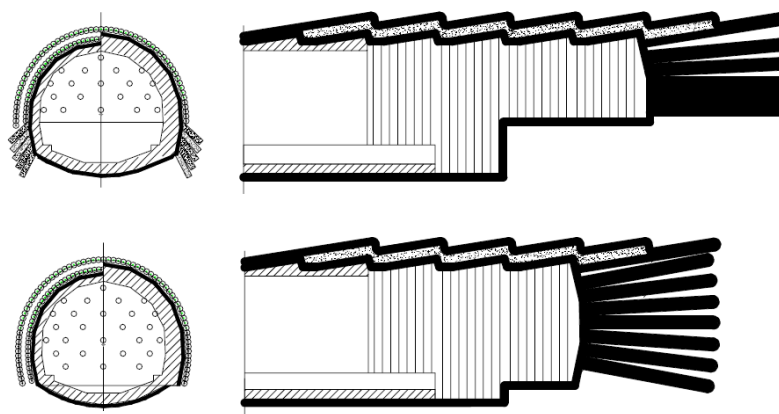
Vhodným příkladem provádění tryskové injektáže z povrchu území je Tunel Blanka konkrétně u Šlechtovy restaurace. Sanace v prostředí zvodnělých štěrkopísků spočívá v provádění obálek vyhotovených z překrývajících se sloupů z tryskové injektáže. (viz. obr.č.12) [22]



Obrázek 12 – Sanační práce prováděné z povrchu území [22]

Postup výstavby možno tedy přizpůsobit každému konkrétnímu případu dle potřeby. Techniky lze taky rychle měnit a přizpůsobit v případě nepředvídatelných podmínek v průběhu ražby. Jako doplňkovou technikou je stříkaný beton, ocelová výztuž nebo sklolaminátové kotvy. [8]

V případě provádění TI v podzemí, lze konstrukční postupy ražby rozdělit na dvě hlavní kategorie. Jde o dělenou čelbu a o ražbu na plný profil (viz. obr.č.13). V obou těchto uvedených případech je trysková injektáž provedena v sub-horizontálním směru vedení štoly či tunelu. Injektážní vrty pak tvoří obálku daného výrubu a následně po zajištění kaloty lze ve výrubu pokračovat. Tímto způsobem lze výrub zajistit předem a ražba může pak dále pokračovat v rozmezí obvykle od 6 do 10 m. [9]

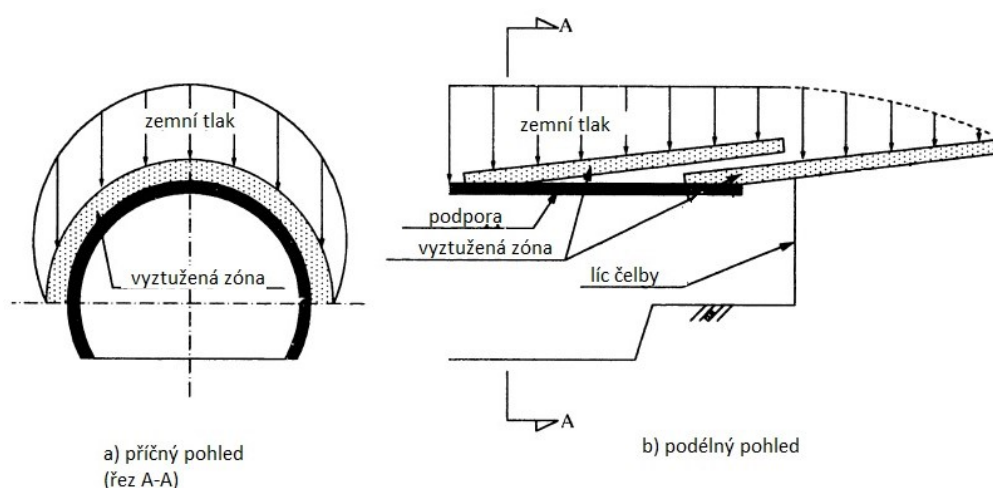


Obrázek 13 - Konstrukční průběhy TI tunelu [12]

4.1. PŘEHLED PRINCIPŮ VYUŽITÍ DEŠTNÍKŮ

V této specifické metodě je před výkopem vytvořena tzv. obloukovitá skořepina, což umožňuje rychlý a bezpečný průběh ražby pod konstrukcí deštníku. Skořápka slouží jako vynikající podpora poskytovaná pro tuto obloukovitou konstrukci. Podpůrným mechanismem metody deštníků, je stabilizace povrchu výkopu v příčném i podélném směru vyztuženou zónou (viz. obr.č.14). Dále pak stabilizace v příčném směru, kdy zemní tlak přenáší obloukem vyztužená zóna (viz. obr.č.14-a). Pokud jde o stabilizaci v podélném směru ražby, zatížení od zeminy je přenášeno nosníkem s jedním koncem podepřeným podpěrou tunelu a druhým koncem podepřeným v zemině (viz. obr.č.14-b). Tímto způsobem dochází ke stabilizaci při ražbě tunelu:

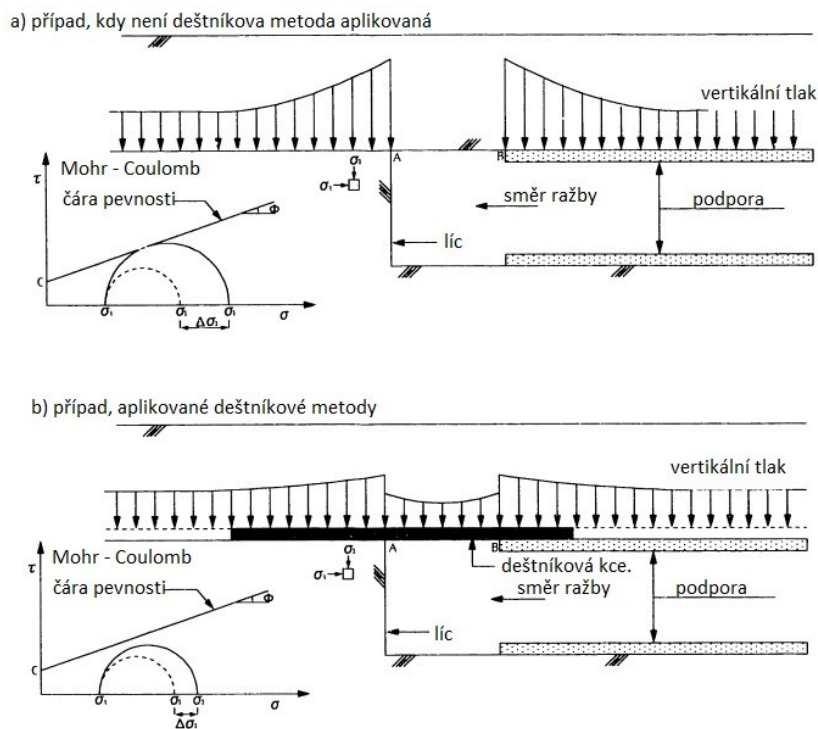
- zadržení sedání terénu před čelbou
- zvýšení stability líce čelby
- zmenšení rozměrů podpor tunelu (stříkaný beton, podpora ocelových oblouků atd.)
- zvětšení profilu ražby, což umožňuje použití velkých strojů a následný rychlý průběh vyhloubení



Obrázek 14 - Schéma mechanismu deštníku [12]

Z těchto účinků uvažujeme nejprve zvýšení stability líce deštníkovou metodou. Před čelem se nachází největší koncentrace napětí, přičemž pak dochází k rychlému poklesu svislého napětí na nulu. Napětí musí být nulové podél nepodporované části tunelu (mezi body A-B) za předpokladu, že podpěry tunelu jsou instalované v určité vzdálenosti za čelem. S nainstalovanými podpěrami by mělo opět dojít ke zvýšení svislého napětí. V případě využití deštníkové metody, je nepodepřená část tunelu (mezi body A-B) podepřena deštníkovou konstrukcí, kde přenáší zemní tlaky (viz. obr.č.15). Je třeba zdůraznit, že díky konstrukci deštníku je koncentrace napětí před a za čelbou podstatně menší. Dále je třeba uvažovat o napjatosti zeminy před lícem výrubu, kdy hlavní svislé a vodorovné napětí je demonstrováno Mohrovou kružnicí. Počáteční stav napětí (σ) je znázorněn přerušovanou čarou kružnice, z čehož vyplývá, že čára pevnosti se nachází dále od kružnice napětí. Jak se líc přibližuje k zemnímu prvku, mění se stav napětí v důsledku zvýšení hlavního napětí σ_3 . Následně, jak plocha kružnice dorazí k čáře pevnosti (viz. obr.č.15 - Mohrova kružnice), Mohrova kružnice

se stává tečnou s čarou pevnosti a dochází k poruše. Naopak, při využití deštníkové obálky, do jisté míry dojde ke zvýšení hlavního napětí, tudíž nedojde k protnutí Mohrovy kružnice a čáry pevnosti. Lez tedy konstatovat, že k porušení nedochází. Ze zmíněného tedy vyplývá, že účinky deštníkové obálky na napěťový stav před lícem výrubu omezuje nárůst hlavního napětí. [23]



Obrázek 15 - Vertikální rozložení napětí a stav napětí před lícem [23]

4.2. KLASIFIKACE DEŠTNÍKOVÉ METODY

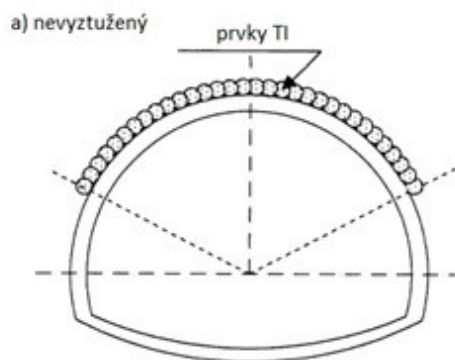
Metodu lze rozdělit do dvou kategorií podle použitých materiálů nebo z hlediska pevnosti zeminy:

a) Nevztlužené

b) Vztlužené

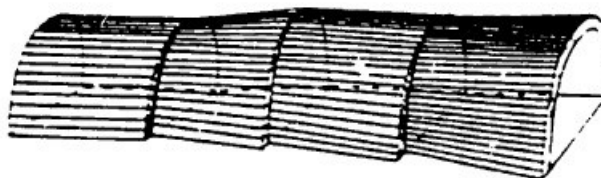
Nevyztužené:

- Metoda sub-horizontální pomocí TI (viz. obr.č.16)



Obrázek 16 - Sub-horizontální TI (nevyztužená) [12]

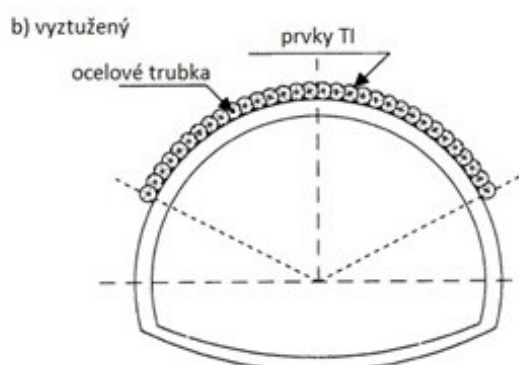
Tato metoda v posledních letech pokročila dopředu a používá se k řešení extrémně obtížných problémů v tunelování, např. kombinace špatných geologických poměrů a mělkého nadloží tunelu. Postup sub-horizontální tryskové injektáže začíná v moment, kdy je vytvořen oblouk raženého tunelu, ražba dále postupuje do určité vzdálenosti od konce ošetřené délky, poté je zahájeno vrtání a tryskání nového oblouku (viz. obr.č.17). Po výkopu v každé části bezprostředně následuje instalace podpěr tunelu. Metoda sub-horizontální TI se provádí v tunelu, a proto je vhodná v případech, kdy je přístup z povrchu obtížný např. v důsledku přítomnosti budov, železnic nebo silnic.



Obrázek 17 - Sub-horizontální metoda [23]

Vyztužené:

- Metoda sub-horizontální injecktáže vyztužené ocelovou trubkou (viz. obr.č.18)



Obrázek 18 - Injektáž ocelových trubek (vyztužené) [12]

Podobně jako metoda sub-horizontální injecktáže, byla metoda injecktovaných ocelových trubek (viz. obr.č.19) původně vyvinuta v Itálii během 80.let, kdy se začala používat při výstavbě tunelů v prostředí velice nestabilních geologických podmínek. Při výstavbě tunelu byla poprvé použita metoda deštníků ocelových trubek. V závislosti na rozestupech mezi vloženými ocelovými trubkami se tato metoda používá pouze a jen v podélném směru vedení tunelu. Z tohoto důvodu lze metodu použít pouze za relativně stabilních podmínek. Co se týče tuhosti deštníku na základě použití kruhových profilů, rozlišujeme dva principy použití:

- vháněné ocelové tyče
- injecktáž předem vyplněné trubky

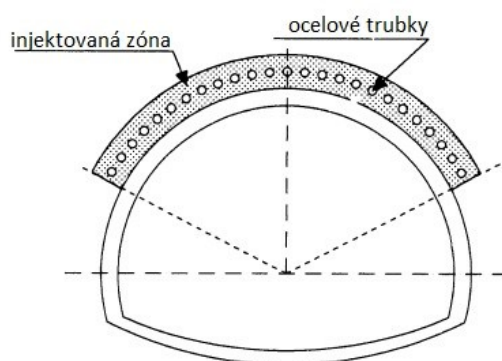


Obrázek 19 - Ocelová trubka [foto Ing. Pinka]



Obrázek 20 - Hlava mikropilotové trubky [foto Ing. Pinka]

Celý proces začíná vyvrtáním řadou otvorů většinou o průměru 100 mm, o délce 12 až 15 metrů (viz. obr.č.20). Následně se do otvorů vloží ocelová trubka, do které se injektuje malta. Velkou předností této metody může být použití v horších geologických podmínkách či při nestabilním nadloží tunelu, díky obloukem vyztužené zóně, která nese tíhu zeminy i v příčném směru. Jedná se o speciální stroj k vyvrtání vrtů s následným vložením ocelových tyčí a následné stříkání injektážní směsi. Stejně tak, jako metoda sub-horizontální injektáže paprskem, se metoda injektovaných ocelových trubek aplikuje uvnitř tunelu (viz. obr.č.21). [23]



Obrázek 21 - Injektovaná zóna vyztužená ocelovou trubkou [12]

4.2.1. NÁVRH VYZTUŽENÉHO DEŠTNÍKU

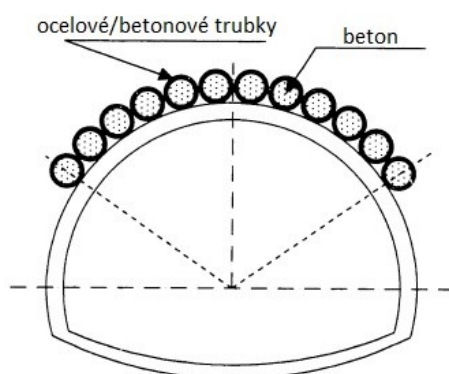
1) Z hlediska prostředí

Metoda souvisí s metodou vrtání. V zásadě lze provádět vrtání různými metodami, jako je: rotační vrtání, rotační vrtání s příklepem. Proto lze injektovat všechny typy hornin na základě použité metody vrtání.

2) Použití ocelové trubky

Ocelová trubka použitá v metodě deštníku se liší průměrem, tloušťkou a délkou podle použité metody vrtání. Kromě toho, pokud je nutné změnit způsob vrtání kvůli špatným geologickým podmínkám, je třeba dále uvažovat jakou tloušťku ocelové trubky použít. Z toho vyplývá, že vztah mezi metodou vrtání a rozměry ocelové tyče je důležitý při výběru nejvhodnější deštníkové konstrukce za jakýchkoli příznivých či nepříznivých podmínek.

- injektáž kruhových profilů vyplněné betonem (viz. obr.č.22)



Obrázek 22 - Injektáž kruhového profilu vyplněné betonem [12]

Jednotlivé metody jsou zobrazeny na schématech. Je třeba si uvědomit, že některé postupy metod tryskové injektáže nebo aplikace ocelové tyče, fungují jako nosný prvek, jak je zobrazeno na obrázku č.14. Zabezpečené nadloží tunelu umožňuje, aby deštníková metoda fungovala jako oblouková kontrakce v příčném směru. Ve výše uvedených kategoriích provedení je patrné, že každá obálka při ražbě souvisí s konkrétní metodou injektáže. Proto je důležité při návrhu této konstrukce porozumět nejen injektáži, ale i vrtání. [23]

NÁZEV TUNELU	UMÍSTĚNÍ	TYP ZASTŘEŠUJÍCÍ METODY
Tunel Hodogaya	Yokohama, Japonsko	Sub-horizontální TI
Tunel Uryuya	Sonobe, Japonsko	Sub-horizontální TI
Tunel Rengershausen	Kassel, Německo	Sub-horizontální TI
Vídeňské metro	Vídeň, Rakousko	Sub-horizontální TI
Tunel Lonato	Verona, Itálie	Zesílená sub-horizontální TI
Tunel Les Cretes	Aosta, Itálie	Zesílená sub-horizontální TI/injektáž ocelových trubek
Tunel Hirai	Miki, Japonsko	Injektáž ocelových trubek
Tunel Ramat	Piedmont, Itálie	Injektáž ocelových trubek
Stanice Venezia	Miláno, Itálie	Injektáž ocelových trubek

4.2.2. METODY VRTÁNÍ

V deštníkové metodě jsou obecně metody vrtání rozděleny do tří typů, jedná se o rotační vrtání, rotační příklepné vrtání či mikrotunelování. Tyto typy dále lze dělit na:

- rotační vrtání:
 - rotační vrtání
 - dvojité rotační vrtání
- rotační příklepné vrtání:
 - rotační vrtání (rotační kladivo umístěno přímo ve vrtu)
 - rotační příklepové vrtání s vrtacím kladivem
- protlačování (mikrotuneling):
 - metoda pilotového ražení
 - metoda pomocí štítu

4.3. METODA MIKROTUNELOVÁNÍ

Mikrotunelování umožňuje dosažení relativně větších profilů. Srdcem celého systému mikrotunelování je razicí štít, který se navrhuje s vrtnou hlavou (viz. obr.č.23) předem zkonstruovanou pro dané horninové prostředí, ve kterém se budoucí ražba provádí a pro daný materiál potrubí. Jako první se do jámy umísťuje razicí štít, za ním dále pak následuje kolona potrubí, která se protlačuje pomocí tlačené hydraulické stanice v jámě. Celé pracoviště se pak skládá z předem vyhloubené jámy, dále prostor pro jeřáb za účelem zpuštění razicího štítu do

jámy, hydraulická jednotka sloužící jako pohon. V případě tunelování na vzdálenosti větší, jak 100 m se používají tunelovací stroje se štíty zvané micro-TBM (micro-Tunnel boring machine). [23]



Obrázek 23 - Mikrotunelovací štít [31]

5. PŘÍKLADY Z PRAXE

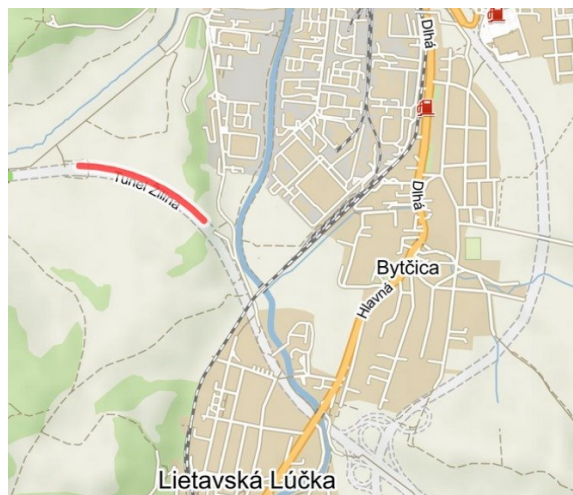
5.1. TUNEL ŽILINA

Veškerý postup provádění vychází z „*Technologický postup provedení stavby Dálnice D1 Hričovské Podhradie – Lietavská Lúčka, dovrchní tryskové injektáže*“, poskytnutý firmou Zakládání staveb, a.s. [18]

Jedním z tunelů, kde byla využita metoda tryskové injektáže je Tunel Žilina (viz.obr.č.24). Tento tunel slouží k prodloužení trasy dálnice D1, přičemž tvoří zároveň i obchvat města (viz. obr.č.25). Tato stavba není výjimečná ani svou délkou ani metodou ražení. Její jedinečnost je dána díky složitým inženýrskogeologickým podmínkám. A proto se jedná o jednu z nejsložitějších tunelových staveb na Slovensku. Průběh stavby komplikovalo geologické prostředí, které bylo daleko složitější, než byl předpoklad projektu poskytnutý zhotovitelem. Na základě toho se posouval termín dokončení stavby a zároveň finanční náklady, díky neustálým změnám postupu ražení, zajišťování stability čelby a metodám vyztužováním. Tunel byl navržen jako dvoutubusový se dvěma jízdními pruhy. Délka ražené části severního tunelu je 648,5 m, jižního tunelu 657 m s maximálním nadložím 38 m. [13]



Obrázek 24 – Portál tunelu Žilina [25]



Obrázek 25 - Lokace tunelu Žilina [26]

5.1.1. SKUTEČNÉ ZASTIŽENÉ POMĚRY

Hned po vyražení pár metrů od západního portálu bylo zřejmé, že zastižené inženýrskogeologické poměry se liší od pokladů poskytnuté zhotovitelem. Zhotovitel se začal následně s těmito nepříjemnostmi ohledně geologického prostředí a jejími projevy dále potýkat.

- Postupy ražení probíhaly v prostředí jílu v kombinaci s nízkou pevností R6. V místech, kde docházelo ke zvětření jílovce se konzistence změnila na jíl o vysoké plasticitě, tuhé až pevné. Docházelo tak k nadměrným deformacím výrubu a k celkovým poklesům ostění od horniny až 200 mm.
- Téměř ihned po vyražení pár metrů se vrchní část kaloty projevila jako vysoce nestabilní, kterou tvořil zvětřený jílovec a zároveň dosahoval až charakteru zemin. Zvětřený jílovec se choval jako sypký, málo ulehlý a nesoudržný materiál. Tento nepříznivý materiál sypkého charakteru spolu s přítomností podzemní vody měl za důsledek ztrátu pevnostních parametrů horninového prostředí. [14]

5.1.2. ZADÁNÍ STAVBY

Cílem bylo realizovat dovrchní tryskovou injektáž ze severní tunelovací trouby raženého tunelu. Podstatou je dosažení průměru jednotlivých sloupů TI podle typu aktuálně

5.1.3. PRACOVNÍ PLOCHA

Po obvodu výrubu bylo navrženo 18 vrtů o daném poloměru, dále pak dva vrty jsou umístěny do profilu ražby. Vzdálenost mezi jednotlivými vrty byla stanovena na 35 cm. Objednavatel předem stanovil umístění návrtného bodu a stejně tak i na protilehlé straně pracovní plošiny byl vytyčen druhý návrtný bod. Vrchol kuželové plochy, jehož obálku tvoří sloupy TI a směr pak určuje spojnice s jednotlivými návrtnými body. Směr dále stanoví vrtná kolona proložením laserovým paprskem mezi návrtným bodem a vrcholem kuželové plochy. Vrty byly hloubeny do vrchně pod daným úhlem o délce 12 m.

5.1.4. POUŽITÉ MECHANISMY

Obrázek 26 - Casagrande PG 115 [30]

Za účelem výroby, uchování injekční směsi, skladování a dávkování byly použity tyto zařízení:

- Tlakový zásobník cementu $25m^3$ od výrobce Demed – Třebíč
- Automatické míchací centrum TWM 30

5.1.5. PROVEDENÍ VRTŮ PRO TI

V předem vyhotoveném projektu se nachází půdorysné rozmístění vrtů pro TI, sklon a směr provádění. Každý z vrtů je popsán svými parametry, aby nedocházelo k omylu při jeho hloubení.

Pro vyhloubení vrtu je vrtná souprava postavena tak, aby směřovala podélně ve směru osy vrtu. Postup ustavení vrtné soupravy probíhá nejdříve ve směru sklonu vrtu následuje úprava sklonu vrtné kolony nacházející se na lafetě stroje. Sklon lafety stroje se nastaví tak, že vrtná korunka se dotýká návrtného bodu na čelbě. Lafeta je následně vložena do laserového paprsku, který vede mezi vytýčeným vrcholem kuželové plochy a návrtným bodem. Veškeré ustavení stroje bylo kontrolováno a při zjištění odchylek opraveno.

Hloubení vrtů probíhalo rotačním způsobem na plný profil čelby vrtným nástrojem o minimálním průměru 95 mm. Za účelem zvýšení účinnosti TI byl proveden částečný předřez cementovým paprskem o min. řezném tlaku 25 - 30 MPa.

Výplach vrtu byl zajištěn cementovým výplachem včetně částečného předřezu. Pro výrobu cementové směsi pro výplach byl použit CEM II 32,5R. Promíchání směsi zajišťuje rychloběžná aktivační míchačka, přičemž po namíchání směsi by měla vykazovat předepsanou obj. hmotnost.

Po použití byla výplachová směs postupně zahušťována, kdy dochází k čištění vrtu a jedná se tak o jediný požadavek na směs při rotačním vrtání s předřezem v daných geologických podmínkách. [18]

5.1.6. INJEKČNÍ SMĚS

Pro TI byla použita cementová injekční směs o poměru $C:V = 0,8$. Předpokládaná pevnost v tlaku po 7 dnech je 6,0 MPa.

Při výrobě cementové injekční směsi byl použit cement CEM II 32,5R. Míchání směsi je zajištěno pomocí rychloběžné aktivační míchačky a musí splňovat předepsanou obj. hmotnost a viskozitu. Následně směs byla udržována v pomaloběžné míchačce, která je v neustálém pohybu. Směs je pak z míchačky odebírána pomocí vysokotlakého injekčního čerpadla.

5.1.7. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

Požadavkem na projekt bylo vytvoření sloupů TI o průměrech 200-600 mm o pevnosti 5,0 MPa po 28 dnech. Aby těchto požadavků bylo dosaženo, byla navržena metoda jednofázová M1.

Dle kalibračních zkoušek injekční sestavy byly na stavbě stanoveny ostatní parametry tryskání. Po provedení každého sloupu je injekční kolona ponechána ve vrtu po dobu 0,0-30 min, následně po této době je kolona vytažena a vrt je utěsněn dřevěným kolíkem.

Veškeré parametry a postupy provádění mohou být v průběhu změněny zhotovitelem na základě skutečně dosažených výsledků. Dále jsou tyto změny zaznamenávány v „technologickém deníku“.

Postup provádění jednotlivých sloupů je stanoven na primární x sekundární x primární (ob jeden) na cementový výplach. [18]

5.1.8. ZÁVĚR PROVEDENÍ

Tunel Žilina není výjimečný metodou ražení a ani délkou, nýbrž ražbou ve složitých geologických a hydrogeologických podmínkách a stále častěji se potvrzuje, že geologický průzkum má zásadní vliv na úspěšné dokončení stavby. Zároveň i poukazuje na operativní přístup zhotovitele při komplikacích, které na stavbě vznikly. Tryskové injektáže by byly vhodným řešením, nicméně při provádění došlo k pohybu čelby. Jako vhodné řešení pro dokončení stavby se použil mikropilotový deštník (viz. obr.č.27).



Obrázek 27 - Mikropilotový dešťník [14]

5.2. TUNELOVÝ KOMPLEX BLANKA

Veškerý postup provádění vychází z „*Technologický postup provedení stavby č. 9515 Myslbekova – Prašný Most. Tryskové injektáže z portálu Prašný most*“, poskytnutý firmou Zakládání staveb, a.s. [17]

V České republice je v současné době bezpochyby největší podzemní stavbou tunelový komplex Blanka v Praze (viz. obr.č.28). V době výstavby byl nazýván jako Tunel Pelc – Tyrolka. Jedná se spíše o soubor staveb budovaných v severozápadní části městského okruhu, přičemž celková délka činí cca 5 500 m. V současné době se jedná o nejdelší tunel v České republice a zároveň nejdelší městský tunel v Evropě. Budovaný úsek Městského okruhu hlavního města Prahy prochází urbanizovaným prostředím střední části města na hranici historického jádra a rovněž prostorem chráněné přírodní památky Královská obora. [15]



Obrázek 28 - Mapa tunelového komplex [16]

Tunelový komplex se skládá ze tří tunelů:

- **Tunelový úsek Brusnice** - Celková délka úseku je 1400 m, z toho je 550 m ražených.
- **Tunelový úsek Dejvice** - Celková délka úseku je 1000 m.
- **Tunelový úsek Královská obora** - Celková délka úseku je 3090 m, z toho je 2230 m ražených. [16]

5.2.1. GEOLOGICKÉ POMĚRY

Geologické podmínky celé stavby jsou poměrně složité a dosti proměnlivé. Trasa tunelů leží v tzv. pražské pánvi, v němž je skalní podloží tvořeno zvrásněným komplexem břidlic, drob, pískovců a křemenců. Hlavní zastoupení mají vrstvy letenských břidlic monotónního i flyšového vývoje. V případě monotónního vývoje se jedná o písčité a prachovité břidlice. Křemence a pískovce tvoří cca 30 až 50 %. Flyšový vývoj letenského souvrství je proti zvětrání odolný a mocnost zvětrání dosahuje většinou menších hodnot okolo 3,0 m. Úsek v údolní nivě řeky Vltavy prochází nekvalitními jílovito-prachovitými břidlicemi a silně rozpukanými křemenci a písčito-prachovitými břidlicemi. Ve složení převládá písčitá hlína se štěrkem, tj. kameny a valouny různé velikosti a stavební suť. Mocnost kvartérních sedimentů dosahuje až 38 m. Podzemní voda sleduje převážně povrch skalního podloží a její hladina se pohybuje v rozmezí 8 až 20 m pod terénem. [16]

5.2.2. ZADÁNÍ STAVBY

Cílem prací bylo za pomoci technologie tryskové injektáže zpevnit nadloží výrubu tunelu v místě portálu Prašný most (viz. obr.č.29). Při zadání stavby projekt požadoval dosažení pokud možno nejmenšího průměru sloupu tryskové injektáže okolo 0,7 m a zároveň dosažení parametrů vhodných ke zpevnění horninového masívu pevností geokompozitu v prostém tlaku 2,0 MPa. Práce týkající se vrtání a injektážních se prováděly z portálu Prašný most. [17]



Obrázek 29 - Myslbekova - Prašný most [27]

5.2.3. PRACOVNÍ PLOCHY A VYTÝČENÍ

Vrtné a injekční práce se prováděly ze pracovní plošiny portálu Prašný most. Za účelem pojezdu použité techniky o celkové hmotnosti do 28 t se nemusela dále pracovní plošina zpevňovat. Pažení portálu v místě realizace technologie tryskové injektáže byl po celé ploše použit stříkaný beton, který musí být v přímém kontaktu se zeminou nebo konstrukcí pažení (bez výskytu dutin). V případě výskytu dutin mezi ostěním a zeminou by injekční směs prováděná dovrchně či vodorovně negativně ovlivňovala jejím vyplňováním kvalitu geokompozitu.

Po obvodě byly rozmístěny vrty s kružnicemi o daném průměru a taktéž i vzájemná vzdálenost mezi jednotlivými vrty. Objednavatelem byly na čelbě vytýčeny, pevně stabilizované návrtné body a následně předány zhotoviteli. Na protilehlé straně pracovní plošiny byl vytýčen druhý bod, který tvořil vrchol kuželové plochy. Následně vznikla obálka tvořící jednotlivé sloupce TI, přičemž jeho spojnice s jednotlivými návrtnými body určují směr hloubení jednotlivých sloupů. Směr vrtu je vytýčen pomocí laserového paprsku mezi patřičným návrtným bodem a vrcholem kuželové plochy. Vrty byly prováděny dovrchně pod daným úhlem a délkou vrtu 17 m. [17]

5.2.4. POUŽITÁ MECHANIZACE

Na základě postupu popsaných prací na stavbě byly použity tyto hlavní mechanismy:

- Vrtná souprava Casagrande PG 115 o hloubce vrtání 150 m
- Vysokotlaké čerpadlo TW 600 o provozním tlaku 50 MPa a čerp. množství 700 l/min

5.2.5. MECHANIZACE PRO VÝROBU A UCHOVÁNÍ INJEKČNÍ SMĚSI, DÁVKOVACÍ A SKLADOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Dle postupu popsaných prací budou použity tyto zařízení pro výrobu a uchování injekční směsi dále dávkovací a skladovací zařízení:

- Tlakový zásobník cementu 25m³ od výrobce Demed – Třebíč
- Automatické míchací centrum TWM 30

5.2.6. HLOUBENÍ VRTŮ PRO TI

Vrty pro tryskovou injektáž byly vyhloubeny dle vyhotoveného projektu, který určuje půdorysné umístění vrtu, směr hloubení a určitý sklon vrtu. Každý z vrtů je dále specifikován svými vlastnostmi a parametry, aby nemohlo dojít k omylu při jeho vyhloubení.

Na předem vytýčený závrtný bod je umístěna vrtná souprava Casagrande PG 115 v předepsaném směru a sklonu. Vrtný nástroj směřuje na vytýčený závrtný bod a lafeta stroje je nastavena ve sklonu dle sklonoměru umístěného na povrchovou přímku soutyčí, směr vrtu

je pak vždy kolmý na vytyčovací přímkou. Celá posádka stroje vždy kontroluje prvotní zavrtání a následně i celý průběh vrtání. Mistr má za úkol hlídat předem nastavený směr a sklon vrtu. V případě vzniku odchylky je nutností tuto skutečnost neprodleně opravit. [17]

Rotačním způsobem plnočelbovým vrtným nástrojem byly hloubeny jednotlivé vrty o průměru 75 až 95 mm, případně bude využit způsob tryskové injektáže při řízeném zapuštění vrtné a injekční kolony v délkách 17 m. Za účelem zvýšení účinnosti TI byl proveden částečný předřez vodním paprskem o minimálním řezném tlaku 25 MPa přes trysky umístěné ve vrtném nástroji.

Vrty byly vyhloubeny na vodní výplach. V moment, kdy by došlo k zavalování vrtů a jejich nestabilitě, vodní výplach by byl zaměněn za výplach cementovou suspenzí, díky nichž by byl vrt zase stabilní.

5.2.7. SLOŽENÍ INJEKČNÍ SMĚSI

Jako injekční směs je použita cementová injekční směs o poměru $C:V = 0,8$. Předpokládaná pevnost v tlaku po 7 dnech je 6,0 MPa.

Při výrobě cementové injekční směsi byl použit cement CEM 32,5R. Míchání probíhalo v rychloběžné aktivační míchačce. Poté musí vykazovat předepsanou objemovou hmotnost a viskozitu. Po dosažení předepsaných parametrů, se směs udržuje v pomaloběžné míchačce, která je v neustálém pohybu. Z míchačky se pak směs odebírá vysokotlakým injekčním čerpadlem. [17]

5.2.8. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

Dle projektu bylo vyžádáno vytvoření sloupů za účelem zpevnění zeminy o minimálním průměru 700 mm a o minimální pevnosti v prostém tlaku 2,0 MPa po 28 dnech. Trysková injektáž je navržena jako metoda jednofázová M1.

Na základě kalibračních zkoušek injekční sestavy byly stanoveny ostatní parametry tryskání na stavbě. Po dokončení každého sloupu TI se injekční kolona ponechala ve vrtu 0,25 – 0,5 hod., po této době byla teprve kolona vytažena a vrt byl utěsněn dřevěným kolíkem. Vrtmistr nebo dílovedoucí pak rozhoduje o délce technologické pauzy po dokončení injektáže.

Dle dosažených výsledků a skutečného průběhu může být průběh injekčních prací technologem zhotovitele změněn dle potřeby. Veškeré případné změny se dále uvedou v „Technologickém deníku“ zhotovitele.

5.2.9. ZKOUŠKY PŘI REALIZACI TI + MARSHOVA METODA

Injekční směs – u každé směsi při záměsi byla měřena objemová hmotnost a viskozita, přičemž veškeré hodnoty byly zapsány do laboratorního deníku. Z jedné záměsi injekční směsi z daného úseku byla odebrána 1 x sada tříválcových vzorků (50 x 150 mm) k vyhodnocení pevnosti v prostém tlaku po 28 dnech. [17]

Ke stanovení viskozity přímo na stavbě lze pomocí Marshovy metody. Tato metoda je nenáročná na čas a přesnost. Principem je zjišťování průtokové viskozity pomocí Marshova trychtýře (viz. obr.č.30). Trychtýř je vyroben z odolného plastu a dále je vybaven plastovou rukojetí. Samotná zkouška se provádí, uzavřením spodního otvoru trychtýře a sítím na horní straně se naplní výplachem až po spodní okraj síta (zhruba 1500 ml). Zkouška spočívá v měření času, za jak dlouho vyteče 1000 ml výplachu skrze spodní otvor. [20]



Obrázek 30 - Marshuv trychtýř [28]

5.2.10. ZÁVĚR PROVEDENÍ

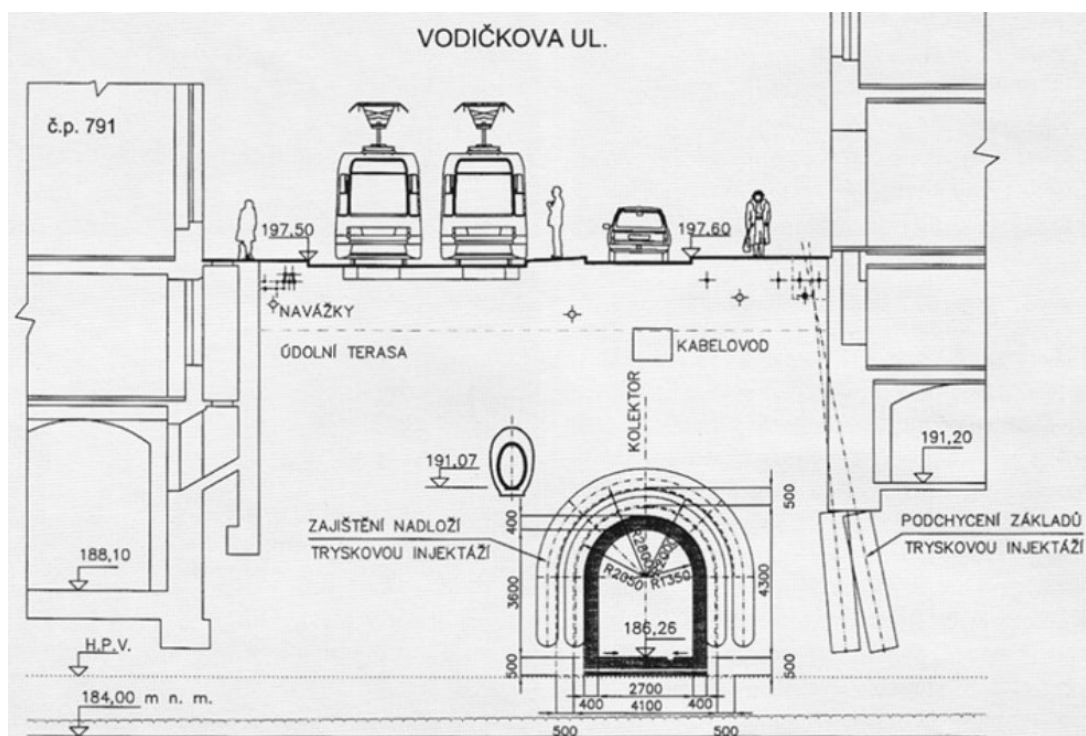
Trysková injektáž byla použita v úseku Myslbekova – Prašný most za účelem vyhnutí se nežádoucímu omezení provozu u dotčených objektů nebo nežádoucímu zásahu do objektů historického rázu. Nejvíce však je ovlivněno barokní opevnění u východního portálu (oblast Prašný most). Díky vhodně zvolené metodě TI, prováděné z čelby raženého tubusu, došlo k úspěšnému snížení deformací.

5.3. RAŽBA KOLEKTORU VODIČKOVA V PRAZE 1

V historickém centru hlavního města jsou kolektory téměř nepostradatelnou součástí podzemních staveb. Nejen, že pro město zajišťují stabilní dodávky elektřiny, vody a plynu, ale také jsou šetrnější k městu v případě havárií a oprav.

Hlavní město Praha nabízí jednu z nejlépe technicky vybavených sítí kolektorů v Evropě. Kolektor Vodičkova poskytuje rozvoj kolektorových sítí a stejně tak pokračování již dokončených větví kolektoru. Délka trasy je 1288 m, příčný profil je navržen na 13-22m²(viz. obr.č.31).

Struktura kolektoru Vodičkova je řešena půdorysně ve tvaru písmene H a tvoří tak systém v oblasti středu Václavského náměstí. Následně umožňuje napojení do šesti směrů. Kolektor je situován po celé délce ulice Vodičkova, přičemž připojovací větve vedou do přilehlých ulic a končí až na Karlově náměstí.



Obrázek 31 - Řez kolektoru Vodičkova [19]

5.3.1. GEOLOGICKÉ POMĚRY

Zájmové území se nachází v převážně náročnějších podmínkách nejen z hlediska umístění v historickém centru, ale i z hlediska geologického. Prostředí, ve kterém je kolektor ražen je štěrkopísek o různé velikosti zrn. Dále v oblasti Václavského náměstí ražba probíhala převážně ve skalním prostředí. V kombinaci geologického prostředí ražení a částečná ražba pod hladinou podzemní vody se výstavba jeví jako velmi riziková.

5.3.2. PRACOVNÍ PLOCHY A VYTÝČENÍ

Ve zpracované dokumentaci ke stavbě kolektoru Vodičková byly stanoveny zóny sledování, zóny ohrožení a zóny poklesu. Na základě těchto okolností byl proveden stavební průzkum objektů v ohrožených lokalitách.

Okolnosti ražby:

Před samotnou výstavbou nejen že ražba probíhala v proměnných geologických podmínkách, ale celá stavba byla soustředěna v centru Prahy, v místě historických a luxusních objektů a v památkové zóně. Ražba probíhala v nepříznivé hloubce pod terénem, částečně pod HPV a pod stávajícími inženýrskými sítěmi. Velký důraz bylo třeba věnovat i zajištění chodu města, jak z hlediska dopravního, tak z hlediska inženýrských sítí jako je telekomunikační síť, kanalizační stoky a vodovodní řád.

Zajištění stávajících objektů:

- Podchycení stěny objektu pomocí TI, která přenáší zatížení zdiva do nižší úrovně.
Toto řešení zamezuje případným deformacím při následné ražbě (viz. obr.č.32).

- Clona z tryskové injektáže, která zamezuje rozvoji poklesové zóny vlivem ražby [19]



Obrázek 32 - Podchycení stávajícího objektu [29]

5.3.3. POUŽITÁ MECHANIZACE

Veškeré práce byly prováděny bezkolejovou mechanizací:

Stroje použité pro ražbu

- JCB 8017 (s impaktorem)
- JCB 8032 (s impaktorem)

Stroje pro odklizení horniny

- LOCUST 752 – čelní nakladač
- PAUS AKV 242 – Objem korby $3m^3$

Mechanizace pro stříkaný beton

- ALIVA 503 – Manipulátor na stříkaný beton
- ALIVA 252 – Zpracování suché směsi betonu

5.3.4. TECHNOLOGIE RAŽENÍ A VYZTUŽENÍ

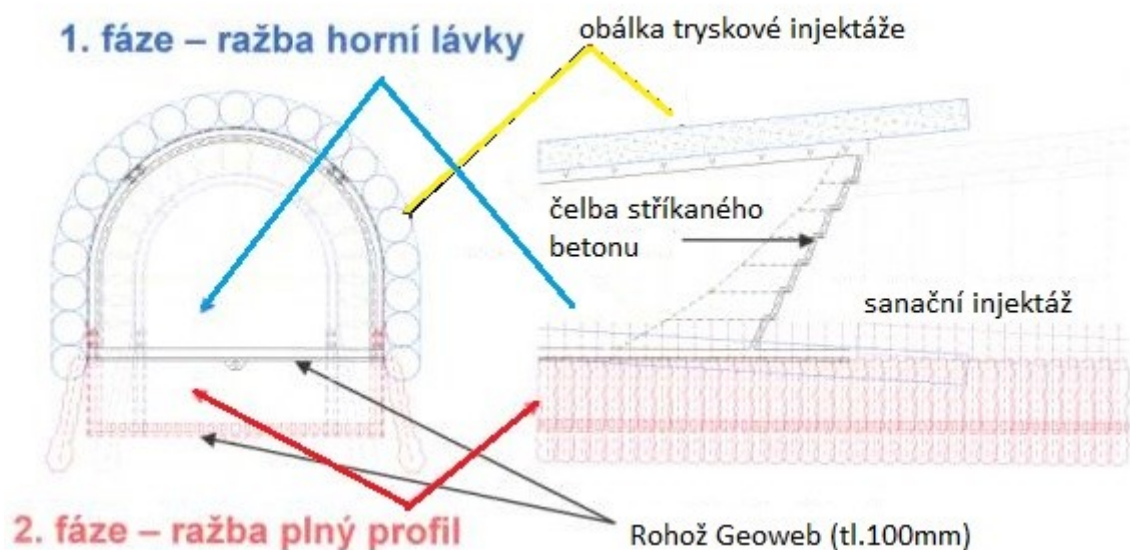
Ochranná obálka za pomoci technologie tryskové injektáže umožňuje pokračování ražby po daných úsecích (viz. obr.č.33). Provizorní ostění bylo pak prováděno ze stříkaného betonu C20/25-X0 o tloušťce 180-250 mm, které pak následně bylo vyztuženo příhradovou

výztuží o rozteči 0,7m-0,9m, stabilitu vnitřního a vnějšího líce zajišťuje Kari síť o průměru 6/100/100 mm.

Ražbu profilu lze rozdělit na dvě fáze. V první fázi ražba probíhala na celý profil a ve druhé fázi byla vytvořena spodní lávka o výšce 1,2 m.

Aby nedošlo k poškození podlahy ve výrubu pojezdem kolové mechanizace, počva byla ochráněna provizorním stříkaným betonem, ten byl chráněn rohoží Geoweb (tl.100 mm), nakonec byla použita vrstva štěrkopísku o tl. 100 mm.

V moment dokončení úseku ražby, který byl pod ochranou TI vějíře, bylo zapotřebí čelbu vyztužit Kari sítí a stříkaným betonem o tl. 25 cm. Následně bylo nutno provést další úsek pod ochranou TI vějíře. [19]



Obrázek 33 - Zajištění nadloží před ražbou [19]

5.3.5. TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

V projektu byl požadavek o vytvoření pilíře o průměru 600 mm pomocí tryskové injektáže. Tyto práce probíhaly přímo z čelby kolektoru a pilíře tak vytvářely ochrannou obálku nad výrubem. Injektážní směs pro vytvoření TI pilířů byla zvolena směs cementová. Přesah injektovaného vrtu byl projektem stanoven na max 1,2m přes délku záběru ve vrcholu klenby. Přesah bočních pilířů je pak snížen na 1,0 m. V jednom úseku pod ochrannou vějíře bylo vytvořeno 17 pilířů v klenbě, a to v pořadí primární x sekundární x primární. Dodatečná tuhost po bocích výrubu byla zajištěna čtyřmi dalšími sloupy TI. Po následném zajištění horninového prostředí byla očekávaná pevnost 1,5 MPa. [19]

5.3.6. ZÁVĚR PROVEDENÍ

Hlavním úkolem technologie trysková injektáž bylo minimalizovat vliv ražby na historický ráz centra Prahy, přičemž geotechnický monitoring poukazuje na kvalitně provedenou práci. Naměřené výsledky totiž prokázaly, že stupeň nebezpečí je minimální a ve varovných stavech jsou značné rezervy.

6. ZÁVĚR

Celá bakalářská práce je rozdělena na čtyři části, přičemž první část je zaměřena obecně na injektáže použité v podzemním stavitelství. V této části jsou popsány média injektáží a aspekty pro výběr vhodné injektáže pro dané prostředí.

Druhá část je zaměřena na technologie tryskové injektáže, dále pak na její metody použití a v neposlední řadě na využití v širokém spektru oblastí této speciální geotechnické metody.

Třetí část práce se zabývá tryskovou injektáží, a to konkrétně u podzemních děl, kde jsem se zabýval možnostmi využití tryskové injektáže dle potřeby a možnosti přístupu. Ať už je to přístup z povrchu či přímo z čelby. Důkladněji jsem se věnoval principu využití deštníkové metody v tunelu. Celkově jsou zde popsány tři metody, avšak každá se volí na základě použitých materiálů nebo z hlediska pevnosti zeminy. Samozřejmě při návrhu těchto konstrukcí je důležitou součástí vrtání, proto jsem v této kapitole okrajově popsal způsoby vrtání.

V poslední části jsem se zabýval stavbami, kde byla metoda TI využita. Jako konkrétní příklad, využití tryskové injektáže jsem si vybral Tunel Žilina. Tento tunel mě zaujal na základě náročnosti při výstavbě, díky nečekaným problémům v podobě závalu a následné sanace. Další komplikací byly poskytnuté podklady ohledně inženýrskogeologických poměrů, které se však ukázaly jako nepravdivé a lišily se od skutečných poměrů. Sanace v podobě dovrchní TI se ukázala jako vhodné řešení, nicméně pro dokončení stavby se použil mikropilotový deštník. Stavba tohoto tunelu byla nelehký úkol, nicméně názorně poukazuje na to, že inženýrskogeologický průzkum nelze brát na lehkou váhu, protože stavět v takových geologických podmínkách vyžaduje nejen dobré znalosti v oboru, ale také dokonale pozorovat odezvy horninového masívu.

Další stavbou, kterou jsem se v bakalářské práci zabýval je Tunelový komplex Blanka, konkrétně v místě výstavby Myslbekova-Prašný most. Celý průběh výstavby vychází z technologického postupu. Metoda využití TI v téhle situaci přesně poukazuje na výhody prostorové nenáročnosti technologie, kde bylo zapotřebí se vyhnout historickým objektům a zároveň zamezit deformacím při ražbě tunelu. Po eliminaci těchto rizik nic nebránilo k úspěšnému dokončení stavby.

Jako poslední stavbu, kde použití tryskové injektáže vedlo ke zdárnému zakončení je ražba kolektoru Vodičkova v Praze. Stavbu jsem volil na základě nevhodných geologických podmínek v kombinaci zastižené HPV a přítomnost inženýrských sítí. I za těchto složitých podmínek se povedlo všechna rizika spojená s deformacemi při ražbě zamezit.

V dnešní době je trysková injektáž důležitou součástí pro zajištění ražby ve zhoršených podmínkách. Jedná se o moderní technologii, která se dále rozvíjí a ve strojních technologiích je dostupná.

7. ZDROJE

- [1] SOLETANCHE - Trysková injektáž [online]. [cit. 14.02.2020]. Dostupné z: http://www.soletanche.cz/technologie_tryskova_injektaz/
- [2] Trysková injektáž | Kospers a.s.. Kospers a.s. | Specialista na zakládání staveb [online]. Copyright © 2015 Kospers a.s. [cit. 14.04.2020]. Dostupné z: <http://kospers.cz/technologie/>
- [3] http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_29.pdf
- [4] Trysková injektáž Soilcrete - Keller založení staveb, zajištění stav. jam [online]. Copyright © KELLER [cit. 07.04.2020]. Dostupné z: <https://www.kellergrundbau.cz/technologie/tryskova-injektaz-soilcrete/>
- [5] MASOPUST, Jan. Navrhování konstrukcí z tryskové injektáže [online]. [cit. 16.4.2021]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/zaklady/20239-navrhovani-konstrukci-z-tryskove-injektaze>
- [6] Mair, R.J. and Taylor, R.N. (1997), "Bored tunnelling in the urban environment", State-of-the-art Report and Theme Lecture, Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg
- [7] A.G.I. Italian Geotechnical Society (1985), "Geotechnical Engineering in Italy", Published on the occasion of ISSMFE Golden Jubilee, pp.111-138.
- [8] Lunardi, P., Mongilardi, E., Tornaghi, R. (1986) "Il preconsolidamento mediante jetgrouting nella realizzazione di opere in sotterraneo", Proc. of the Conference Grandi opere sotterranee, Florence, 2, pp. 601-612.
- [9] Cresta, L., Serra, A., (1991) "L'uso del jet-grouting nell'esecuzione di gallerie in terreni sciolti", Proc. of the Conference Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo, Società Italiana Gallerie, Milano
- [10] Bickel, J.O., Kuesel, T.R., King, E.H., Tunnel Engineering Handbook (second edition), Chapman and Hall, New York, 1996.
- [11] American Society of Civil Engineers (ASCE), Verification of Geotechnical Grouting, Geotechnical Special Publication No.57, Bytle, M.J., Borden, R.H. (eds.), New York, 1995
- [12] Geo – Fronte Research Association, Technical Report on the Rodin Jet Fore-Poling (RJFP) Method, January, 1994.
- [13] Časopis Tunel: Razenie Tunelu Žilina - predpoklad verzus realita. 25. 4. 2016.
- [14] Časopis Tunel: Tunel Žilina, stavba ktorá preverila odbornú zdatnosť zhotoviteľa. 27. 4. 2018.
- [15] CzTA : Tunelový komplex Blanka v Praze. [online]. Copyright © WebActive s.r.o. [cit. 01.03.2021]. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/cz/podzemni_stavby/podzemni_stavby_v_provozu/tunelovy-komplex-blanka-praze.html
- [16] Časopis Tunel: Tunelový komplex Blanka. 16. 2007.

- [17] Zakládání staveb, a.s., Technologický postup provedení stavby č. 9515 Myslbekova – Prašný Most. Tryskové injektáže z portálu Prašný most. Praha 2010
- [18] Zakládání staveb, a.s. „Technologický postup provedení stavby Dálnice D1 Hričovské Podhradie – Lietavská Lúčka, dovrchní tryskové injektáže“, Bratislava 2016
- [19] Ražba kolektoru Vodičkova v Praze 1 pod ochranou tryskové injektáže. [online] Copyright © DocPlayer.cz [cit. 16.03.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4729337-Razba-kolektoru-vodickova-v-praze-1-pod-ochranou-tryskove-injektaze-driving-of-collector-vodickova-street-prague-1-with-the-jetgrouting-protection.html>
- [20] Měřicí přístroje pro vrtný výplach. GETRA [online]. GE-TRA s.r.o., 2009-2018. [cit. 12-2018] Dostupné z: <https://www.ge-tra.cz/katalog/tesnici-vyplachove-latky/merici-pristroje-pro-vrtny-vyplach>
- [21] Zakládání staveb, a. s. - Trysková injektáž. [online]. Copyright © 2008 [cit. 16.04.2021]. Dostupné z: <https://www.zakladani.cz/cs/vyrobní-program/technologie/tryskova-injektaz>
- [22] Časopis Zakládání staveb, a.s.. XX. 2008. ISSN ISSN 1212 – 1711.
- [23] MURAKI, YOSHINAO. The Umbrella Method of Tunneling. Massachusetts, 1997. Degree of Master of Science. Massachusetts Institute of Technology.
- [24] Other engineering | Drilling Machine TOHO CHIKAKOKI CO.,LTD.. [online]. Dostupné z: https://www.tohochikakoki.co.jp/english/construction/works_details.php?id=5
- [25] Tunel Žilina – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tunel_%C5%BDilina
- [26] Mapy Google. Google [online]. c2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://maps.google.com/>
- [27] Stavba č. 9515 Myslbekova – Prašný most (MYPRA). Časopis SILNICE ŽELEZNICE - Rozvoj dopravní infrastruktury v České republice, na Slovensku i ve světě. [online]. Copyright © Copyright 2002 [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/stavba-c-9515-myslbekova-prasny-most-mypra/>
- [28] Viskozimetr Marsh | strojeprozkusebnictvi.cz. Stroje pro zkušebnictví | strojeprozkusebnictvi.cz [online]. Copyright © 2011, Polní 23 [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/viskozimetr-marsh.html>
- [29] KONVIČKA, Vladislav. Solvayovylomy. Podzemi.solvayovylomy [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/start.htm>
- [30] Podzemní stavby. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 18.04.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16518265-Obsah-aktuality-dopravni-stavby-podzemni-stavby.html>
- [31] Časopis Tunel: Mikrotunelování v proměnlivých geologických podmínkách. 23. ročník. 2014.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Dosah využití TI [1].....	6
Obrázek 2-možnosti využití TI [2].....	7
Obrázek 3-Obálka pro výrub štoly tunelu [21]	7
Obrázek 4-Zapažení výkopu stavební jámy kotvenou stěnou [21]	7
Obrázek 5- Podchycení stávajícího základu objektu [21].....	7
Obrázek 6- Technologie provedení jednofázové TI [5]	8
Obrázek 7- Technologie provedení dvojfázové vzduchové TI [5]	8
Obrázek 8- Technologie provedení dvojfázový (vodní) systém [5].....	9
Obrázek 9- Technologie provedení trojfázový systém [5]	9
Obrázek 10- Čerpací a mísící stanice značky KELLER [4]	10
Obrázek 11- Vrtací souprava [21].....	11
Obrázek 12 – Sanační práce prováděné z povrchu území [22]	12
Obrázek 13 - Konstrukční průběhy TI tunelu [12]	13
Obrázek 14 - Schéma mechanismu deštníku [12].....	14
Obrázek 15 - Vertikální rozložení napětí a stav napětí před lícem [23]	15
Obrázek 16 - Sub-horizontální TI (nevzdušená) [12].....	16
Obrázek 17 - Sub-horizontální metoda [23].....	16
Obrázek 18 - Injektáž ocelových trubek (vzdušené) [12]	17
Obrázek 19 - Ocelová trubka [foto Ing. Pinka]	17
Obrázek 20 - Hlava mikropilotové trubky [foto Ing. Pinka].....	18
Obrázek 21 - Injektovaná zóna vzdušená ocelovou trubkou [12].....	18
Obrázek 22 - Injektáž kruhového profilu vyplněné betonem [12].....	19
Obrázek 23 - Mikrotunelovací štít [31]	21
Obrázek 24 – Portál tunelu Žilina [25].....	22
Obrázek 25 - Lokace tunelu Žilina [26].....	23
Obrázek 26 - Casagrande PG 115 [30].....	24
Obrázek 27 - Mikropilotový deštník [14].....	27
Obrázek 28 - Mapa tunelového komplex [16].....	28
Obrázek 29 - Myslbekova - Prašný most [27].....	29
Obrázek 30 - Marshuv trychtýř [28].....	32
Obrázek 31 - Řez kolektoru Vodičkova [19]	33
Obrázek 32 - Podchycení stávajícího objektu [29].....	35
Obrázek 33 - Zajištění nadloží před ražbou [19].....	36